

증류수-부동액 혼합 Al₂O₃ 나노유체의 열전도도와 점성계수

권혜림¹⁾ · 황교식¹⁾ · 장석필^{*2)}

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과¹⁾ · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부²⁾

Thermal Conductivity and Viscosity of Distilled Water/Commercial Coolant Based Al₂O₃ Nanofluids

Hey Lim Kwon¹⁾ · Kyo Sik Hwang¹⁾ · Seok Pil Jang^{*2)}

¹⁾Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi 412-791, Korea

²⁾School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi 412-791, Korea

(Received 29 September 2010 / Accepted 7 December 2010)

Abstract : Experimental investigations are conducted to figure out the feasibility of Al₂O₃ nanofluids as the alternative coolant for car engine. For the purpose, the thermal conductivities and viscosities of water/commercial coolant based Al₂O₃ nanofluids with 0.3, 1.0, 2.0 and 3.0 vol. % at temperatures ranging from 25°C to 35°C are measured. Thermal conductivities are measured using the transient hot-wire method and also viscosities are measured by Brookfield LVDV-III rheometer. Based on the results, it is shown that thermal conductivity of Al₂O₃ nanofluids with 3.0 vol. % is increased about 11% at 35°C and the increment of viscosity approaches to 84% at shear rate of 600(1/s) and 80% at shear rate of 960(1/s) in the same temperature. with fundamental data for the thermal conductivity and viscosity of the nanofluids, the feasibility of Al₂O₃ nanofluids as the alternative coolant for car engine are discussed.

Key words : Al₂O₃ nanoparticles(알루미나 나노입자), Nanofluids(나노유체), Viscosity(점성계수), Commercial coolant(상용 냉각유체), Thermal conductivity(열전도도)

Nomenclature

k : thermal conductivity, W/mK
 q : heat rate, W/m
 t : time, sec
 T : temperature, K
 η : viscosity, cP
 Φ : volume fractoin of nanofluids

nf : nanofluids
p : nanoparticles

Subscripts

bf : basefluids

1. 서론

최근 지구 온난화 현상이 생태계를 위협하면서 온난화 현상의 주원인인 이산화탄소 가스의 배출량을 감소시키기 위한 정책들이 세계 여러 국가들에 의해 발표되고 있다. 특히 운송 에너지에서 자동차가 이산화탄소 배출량의 80%를 차지하고 있으며 또한 이산화탄소 배출량과 자동차 연비가 깊은 관련이 있어 자동차에 대한 개선이 집중적으로 요구되고 있다. 이런 이슈들에 의해 기존 냉각유체를 소형

*Corresponding author, E-mail: spjang@kau.ac.kr

화함으로써 열전달 성능을 향상시켜 연비향상을 이룰 뿐만 아니라 이산화탄소 배출량을 줄이려는 시도가 계속되고 있다.¹⁾ 하지만 여전히 냉각 유로의 소형화는 냉각수를 냉각 유로로 흐르게 하는데 필요한 펌핑과워(Pumping Power)를 매우 증가시키게 되어 실제 연비 개선에 한계가 있음이 보고되고 있다.²⁾ 따라서 동일한 펌핑과워(Pumping Power) 조건에서 연소실 냉각성능 증가시킬 수 있는 새로운 돌파구가 필요한 시점에 있다.

나노입자를 유체 속에 분산, 부유시킨 나노유체가 개발되었으며 그 유체의 특성이 지난 10여 년간 많은 연구자들에 의해서 실험 및 이론적으로 제시되었다. 그 결과에 의하면 일반 열전달 유체보다 열전달 특성 즉 열전도도 및 대류열전달 계수가 우수하다고 보고하고 있다.³⁻¹¹⁾ 특히 최근에 Beck et al.¹²⁾은 나노유체의 특성을 자동차 냉각 유체에 응용하기 위해서 자동차 냉각유체의 기본인 증류수와 에틸렌글리콜을 부피비 1:1로 혼합시킨 기본 유체에 알루미늄 나노입자를 부피비 0.5~4%까지 분산시켜 자동차 냉각용 나노유체를 제작하였다. 그리고 제작된 자동차 냉각용 나노유체의 열전도도를 측정하여 기본 유체보다 최고 9%까지 상승한다고 보고하였다. 그리고 Patel et al.¹³⁾은 Beck et al.¹²⁾과 동일한 증류수와 에틸렌글리콜 혼합유체에 0.5~3%의 알루미늄 나노유체 유효열전도도를 측정하여 증류수와 에틸렌글리콜을 혼합한 유체보다 최고 14.5%까지의 상승한 결과를 발표하였다.

그러나 Beck et al.¹²⁾과 Patel et al.¹³⁾의 결과를 살펴보면 동일한 기본유체에 동일한 제작방법(Two-step Method)로 제작된 나노유체이지만 열전도도의 결과가 최대 5.5% 정도 차이가 남을 확인할 수 있다. 이러한 열전도도 측정 결과에 영향을 미치는 인자를 찾아보면 나노유체에 분산된 나노 입자의 크기, 나노 입자, 분산 방법 즉 Ph나 기타 첨가제, 마지막으로 열전도도 측정 오차 등임을 알 수 있다.

하지만 비록 열전도도 상승폭은 다르지만 분명 기본 유체보다 열전도도 10% 정도 크게 증가한다는 사실은 공통된 결론임을 확인할 수 있다. 또한 위 두 연구에서 확인할 수 있는 사실은 나노유체를 실제 냉각시스템에 적용하는데 필요한 펌핑과워를 예측

할 수 있는 증류수와 에틸렌글리콜을 기본으로 하는 나노유체의 점성계수에 대한 연구는 보고하지 않고 다만 열전달 특성이 향상된다는 결과만 보고하고 있다.

따라서 본 연구에서는 차량용 냉각 구동 장치에 나노유체의 적용 가능성을 파악하기 위해서 첨가제가 모두 포함된 실제 상업용 차량 냉각 유체인 부동액과 증류수가 혼합된 알루미늄 나노유체의 열적 특성 및 유동 특성에 관한 연구를 실시하고자 한다. 이를 위해 부피비 1:1로 증류수와 에틸렌글리콜을 주성분으로 하는 자동차용 냉각 유체인 부동액(극동제연)을 혼합한 기본 유체에 알루미늄 나노입자를 Two-step 방법을 이용하여⁵⁾ 분산시켜 나노입자 부피비가 0.3%, 1%, 2% 그리고 3% 되도록 제작하였다. 제작된 나노유체의 열전도도 및 점성계수를 25°C부터 35°C까지의 온도영역에서 측정하였다. 측정된 기본 물성을 바탕으로 차량용 냉각 구동 장치에 나노유체의 적용 가능성을 파악하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 나노유체 제작

본 연구에서는 부피비 1:1로 증류수와 에틸렌글리콜을 주성분으로 하는 자동차용 냉각 유체인 상업용 부동액(극동제연)을 혼합한 기본 유체에 알루미늄 나노입자를 Two-step 방법을 이용하여⁵⁾ 분산시켜 나노입자 부피비가 0.3%, 1%, 2% 그리고 3% 되도록 제작하였다. 제작 방법은 우선 알루미늄 나노입자(Nanophase, 45nm)를 증류수(DI-water)에 분산

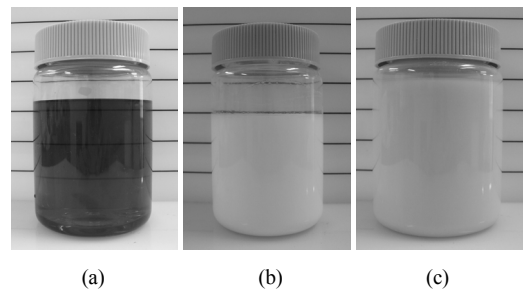


Fig. 1 (a) The picture of commercial coolant
(b) Water-based Al₂O₃ nanofluids
(c) Water/Commercial coolant-based Al₂O₃ nanofluids

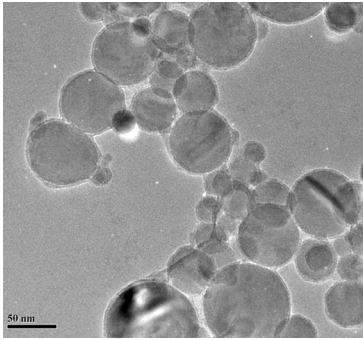


Fig. 2. TEM of Water/Commercial coolant-based Al₂O₃ nanofluids

시켜 초음파 에너지를 5시간 동안 가해주고, 그 후에 자동차용 냉각유체인 부동액을 증류수와 같은 부피비로 첨가하여 초음파 에너지를 5시간 추가적으로 가한다. Fig. 1(c)은 본 연구에서 제작된 물-부동액 혼합 알루미늄 나노유체의 사진이다. Fig. 2는 분산된 알루미늄 나노입자(Nanophase, 45nm)의 분포를 확인하기 위해 투과전자현미경(TEM)으로 촬영한 사진이다.

2.2 열전도도 측정 장치 및 방법

본 연구에서는 알루미늄 나노유체의 열전도도를 측정하기 위해서 비정상 열선법(Transient Hot Wire Method)을 이용하였다. 비정상 열선법의 기본 방정식은 열확산방정식(Heat diffusion equation)으로부터 온도 차에 관한 해로 주어지며 이를 열전도도에 대한 식으로 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$k = \frac{q}{4\pi} \frac{(\ln t_2 - \ln t_1)}{(T_2 - T_1)} \quad (1)$$

여기서, q 는 백금선에 가해지는 단위 길이 당 열량, ΔT 는 시간 변화, t 사이의 백금선 온도 변화를 나타낸다. 시간에 따른 온도상승을 측정하여 로그 시간-온도의 관계로 나타내면 열전도도를 결정할 수 있다. 정밀한 온도상승을 계산하기 위하여 온도를 직접 측정하기 보다는 Wheatstone bridge와 백금선을 이용하여 간접적으로 온도차를 결정한다. 따라서 실험 장치는 저항측정을 위한 Wheatstone bridge

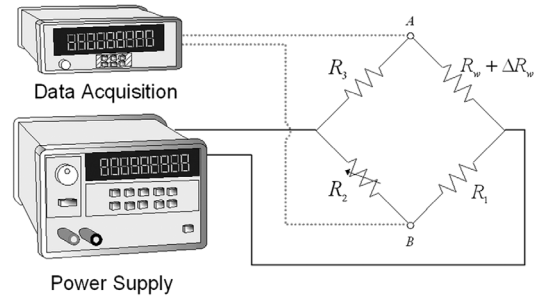


Fig. 3 Schematic diagram of THW apparatus

와 측정된 Data를 수집하기 위한 Data Acquisition, 그리고 백금선에 전원을 공급하기 위한 Power supply로 구성된다. 백금선의 직경은 50 μ m이며 테프론(Teflon)이 25 μ m의 두께로 코팅되어 있어 실험이 진행되는 동안 절연된 상태를 유지한다. Fig. 3은 비정상 열선법을 이용한 열전도도 측정 장치를 보여준다. 실험 장치는 증류수와 에틸렌글리콜을 주성분으로 하는 자동차용 상용 냉각유체를 혼합하여 만든 유체를 기본으로 하는 알루미늄 나노유체를 측정하기 전에 증류수(DI-water)와 에틸렌글리콜(EG)을 이용하여 검증되었다. 측정 결과 Reference Data¹⁴⁾와 $\pm 1.5\%$ 범위 내로 측정됨을 확인하였다.

Uncertainty analysis는 열전도도에 관한 식 (1)을 전개하여 얻을 수 있는 식 (2)을 이용하여 $\pm 1.5\%$ 라는 값을 구할 수 있다.

$$\frac{u_k}{k} = \sqrt{\left(\frac{u_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2} \quad (2)$$

2.3 점성계수 측정 장치 및 방법

나노유체의 점성 계수는 Brookfield사의 LVDV-III Ultra+ Rheometer cone and plate 타입을 이용하여 측정하였다. 점도계는 회전형 점도계(Rotational Rheometer)로 측정 원리는 유체에 잠겨있는 스피들(Spindle)이 회전하기 위하여 필요한 전단응력(Torque)을 측정하여 점성 계수를 구하는 것이다. 전단응력은 스피들의 회전 속도에 비례하며 스피들의 전단율 속도는 스피들의 크기와 모양에 따라 다르며 이에 따라 측정 가능한 점성계수의 범위도 다르다.

점성 계수 측정 장치는 측정하는 동안 온도를 일정하게 유지시켜 줄 수 있는 항온 시스템과 Data를

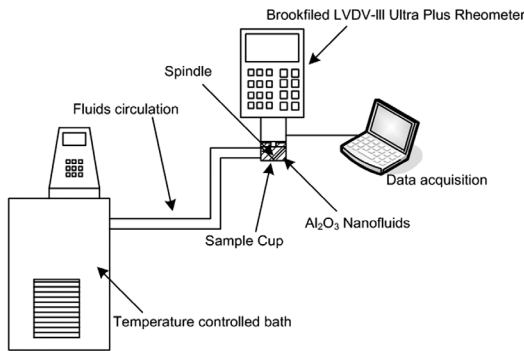


Fig. 4 Experimental setup for measuring viscosity of nano-fluids

보다 정확하게 얻기 위하여 Brookfield사에서 제공하는 소프트웨어를 설치한 컴퓨터, 점도계를 연결하여 구성하였고 이를 Fig. 4에 나타내었다.

본 연구에서 제작된 나노유체의 점성 계수를 측정하기에 앞서 증류수(DI-water)와 에틸렌글리콜을 측정하였으며, 결과를 Reference Data¹⁴⁾와 비교하였다. Brookfield사가 제시한 Accuracy인 특정 Shear rate에서 측정 가능한 범위의 ±1.0% 내에서 측정값이 일치하는 것을 확인하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 열전도도 측정 결과

본 연구에서는 극동제연에서 제작된 상용 냉각유체인 부동액과 증류수를 부피비 1:1로 혼합하여 만든 기본 유체에 부피비 0.3, 1, 2, 3%로 알루미늄 나노입자를 분산시킨 나노유체의 열전도도를 비정상 열선법(Transient Hot Wire Method)을 이용하여 25°C, 30°C, 35°C의 온도에서 측정하였다. 측정 결과는 Fig. 5에서 보이는 것처럼 부피비가 증가할수록 열전도도가 상승하는 경향을 보였다. 35°C에서 부피비 0.3% 나노유체의 열전도도가 기본 유체에 비하여 3% 정도의 증가량을 보였으며 부피비 3%를 가지는 나노유체는 11%까지 증가하였다. 본 실험 결과를 Beck et al.¹²⁾과 Patel et al.¹³⁾의 열전도도 측정결과와 비교하였을 때, 부피비에 따라 열전도도가 증가하는 경향성이 2% 범위 내에서 정량적으로 비슷하였다. 또한, 본 연구에서는 25°C, 30°C, 35°C의 온도에서 측정된 열전도도의 값이 측정값 평균의

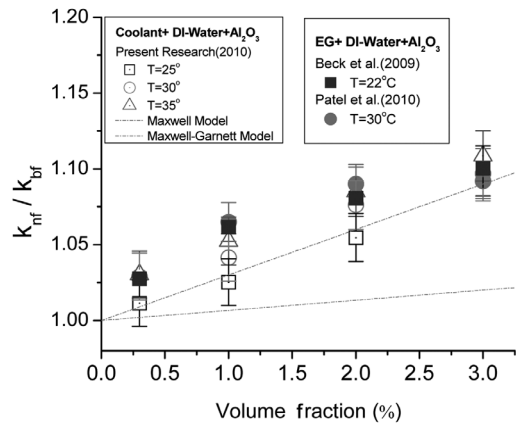


Fig. 5 Experimental result for thermal conductivity of nanofluids

±1.5% 범위 내에서 측정되어 온도 의존성의 영향을 크게 확인할 수는 없었다. 이는 Two-step 방법을 이용하여 제작된 물-부동액 혼합 나노유체에서 온도 의존성을 확인할 수 없다는 것을 보여준다. Maxwell Model를 적용할 때 k_p ¹⁴⁾는 Gang Chen의 Size Effect가 고려되지 않았다.

위의 결과로부터 열전도도 측정 결과와 기존 연구자들의 경향성과 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

또한 대부분의 결과가 Upper Bound인 Maxwell Model¹⁵⁾과 Lower Bound인 Hasselman Model¹⁶⁾을 벗어나고 있음을 확인할 수 있다.

Maxwell Model

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2\phi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \phi(k_p - k_f)} \quad (3)$$

Hasselman Model

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{[k_p(1 + 2\alpha) + 2k_m] + 2\phi[(k_p(1 - \alpha) - k_m)]}{[k_p(1 + 2\alpha) + 2k_m] - \phi[(k_p(1 - \alpha) - k_m)]} \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 나노유체의 부피비이고, k_p 는 나노입자의 열전도도, k_f 는 기본유체의 열전도도, k_m 은 matrix conductivity이며 α 는 나노입자의 Biot 수이다.

3.2 점성 계수 측정 결과

본 연구에서 제작한 상용 냉각유체인 부동액과 증류수를 기본 유체로 하는 0.3, 1, 2, 3%의 부피비를 가지는 알루미늄 나노유체의 점성 계수를 측정하였

다. 일반적으로 많은 연구자들에 의해 나노유체의 점성계수가 전단율(Shear Rate)에 따라 변하지 않는 Newtonian Fluid로 보고¹⁷⁻¹⁹⁾하고 있지만 최근에 몇몇 연구자들²⁰⁻²⁷⁾에 의해서 전단율에 따라 점성계수가 많이 변화하는 것으로 알려지고 있다. 따라서 본 연구에서는 부동액이 자동차 냉각시스템에 흐를 때 발생하는 평균 전단율 범위인 약 600~20,000 (1/s) 중에서 600 (1/s)부터 현재 보유하고 있는 점도계의 측정 한계 범위인 960(1/s)까지 25°C, 30°C, 35°C에서 측정하였다.

Fig. 6과 7에서 보듯이 모두가 동일 전단응력일 때 0.3~3%의 부피비를 가지는 나노유체의 점성 계수는 부피비가 높을수록 증가하는 것을 확인할 수 있다.

특히 측정된 실험 결과는 기존 유효점성계수를 예측하는데 널리 사용되고 있는 Einstein 모델²⁸⁾과 Batchelor²⁹⁾ 모델 결과와는 매우 상이한 결과를 확인할 수 있었다. 첫 번째 나노입자 부피비에 따른 유효 점성계수 증가 현상이 선형적이지 않고 비선형적으로 나타났으며 두 번째는 기존 Model 결과 대비 5배 이상 증가하였다는 것이다. 특히 전단율 값이 600(1/s)에서 부피비 3%의 나노유체가 61%정도의 상승을 보였으나 30°C에서는 약 73% 정도 증가하였고 35°C에서는 약 84% 정도의 유효점성계수의 증가를 보였다. 또한 전단율 값이 960(1/s)에서 부피비 3%의 나노유체가 60% 정도의 상승을 보였으나 30°C에서는 63%의 유효점성계수의 증가를 보였고 35°C에서는 약 80% 정도 증가하였다. 또한 본 연구에서 3% 고농도의 부피비에서 높은 전단율 값인 960(1/s)에서의

유효점성계수 상승폭이 낮은 전단율 값인 600(1/s)에서의 상승폭 보다 적음을 확인할 수 있었다. 이는 나노유체가 고농도에서 Shear thinning 현상이 발생한다는 것을 확인할 수 있었으며 물-부동액 혼합 나노유체가 Non-Newtonian 유체임을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구 결과는 최근에 나오는 연구결과와 경향이 일치함을 확인할 수 있었다.

Einstein Model

$$\eta_{nf} = \eta_{bf}(1 + 2.5\Phi) \quad , \quad \Phi < 0.01 \quad (5)$$

Batchelor Model

$$\eta_{nf} = \eta_{bf}(1 + 2.5\Phi + (2.5\Phi)^2) \quad , \quad 0.01 < \Phi < 0.1 \quad (6)$$

여기서, η_{nf} 와 η_{bf} 는 각각 나노유체의 점성계수와 기본 유체의 점성계수 이다.

본 연구결과에서 제시한 기본 물성치를 바탕으로 기존의 연구자들이 제시한 열전도도 상승은 확인할 수 있었으나 그 결과와 더불어 점성계수의 상승 또한 매우 커서 현 단계의 결과만으로 바로 상용시스템에 적용하는 것은 기술적으로 힘들 것으로 사료된다. 다만 두 가지 측면에서 자동차 냉각유체로 본 나노유체의 적용 가능성이 여전히 존재함을 확인할 수 있었다. 첫 번째는 자동차 냉각장치에서의 평균 전단율이 20,000 (1/sec)정도까지 증가함으로 현재 측정 범위에서 20,000까지 선형 보간할 경우 Fig. 8에서 보듯이 기본 유체특성보다 점도 특성이 낮아질 수 있음을 예측할 수 있다. 따라서 이런 경우에 자동차 냉각장치의 냉각유체로 사용이 가능할 것으

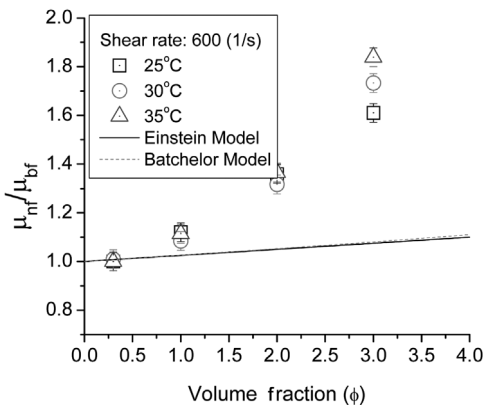


Fig. 6 Viscosity of alumina nanofluids at low shear

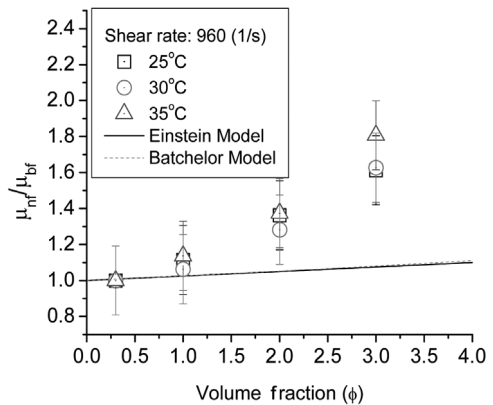


Fig. 7 Viscosity of alumina nanofluids at high shear rate

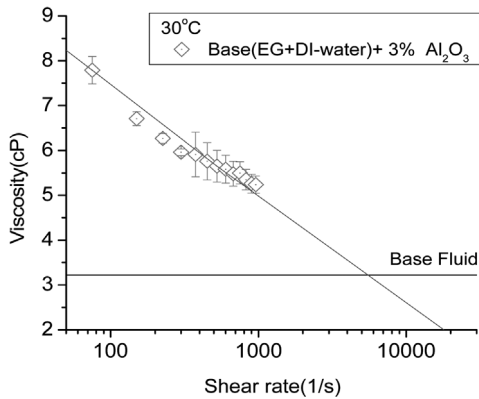


Fig. 8 Viscosity of alumina nanofluids at high shear rate

Table 1 Thermal conductivity and heat transfer coefficient

Flow	Previous research	Results
Turbulent	Pak and Cho ³⁰⁾	$k_{eff} \sim 21\% \uparrow$, $h_{eff} \sim 75\% \uparrow$
	Nguyen et al. ³¹⁾	$k_{eff} \sim 21\% \uparrow$, $h_{eff} \sim 40\% \uparrow$
	Kim et al. ³²⁾	$k_{eff} \sim 8\% \uparrow$, $h_{eff} \sim 20\% \uparrow$
Laminar (Developing)	Wen and Ding ³³⁾	$k_{eff} \sim 11\% \uparrow$, $h_{eff} \sim 47\% \uparrow$
	Kim et al. ³²⁾	$k_{eff} \sim 8\% \uparrow$, $h_{eff} \sim 15\% \uparrow$
	Anoop et al. ³⁴⁾	$k_{eff} \sim 6\% \uparrow$, $h_{eff} \sim 25\% \uparrow$
Laminar (Developed)	Hwang et al. ³⁵⁾	$k_{eff} \sim 1.4\% \uparrow$, $h_{eff} \sim 8\% \uparrow$

로 생각되어진다. 두 번째는 많은 연구자들이 증류수를 기본 유체로 하는 알루미늄 나노유체의 대류 열전달 계수에 대한 실험을 한 결과 나노유체의 열전도도 증가 폭보다 대류 열전달 계수의 증가 폭이 훨씬 큰 것을 보고 한 바 있다. 결과에 의하면 Table 1에서 보듯이 열전도도 증가폭 대비 대류 열전달 계수가 무려 50% 이상 상승되는 결과를 확인할 수 있다. 따라서 이 두 가지 결과를 때문에 여전히 본 나노유체가 자동차 차세대 냉각유체로서의 적용가능성이 존재함을 예상할 수 있었다. 또한 향후 본 나노유체의 실차 테스트가 요망 될 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 나노유체의 차량용 냉각 구동 장

치의 적용 가능성을 파악하기 위해 첨가제가 모두 포함된 실제 상업용 차량 냉각 유체인 부동액과 증류수가 혼합된 이용한 나노유체의 열적 특성 및 유동 특성에 관한 연구를 실시하였다. 이를 위해서 물 (DI-water)과 상용 냉각유체인 부동액을 부피비 1:1로 혼합한 기본 유체에 알루미나 입자가 0.3%, 1%, 2%, 3%의 부피로 분산되어 있는 나노유체의 열전도도와 점성 계수를 25°C, 30°C, 35°C에서 측정하였다. 부피비 3% 나노유체의 열전도도는 35°C에서 최고 11%까지 증가하였고, 점성계수는 실제 자동차의 냉각유체의 운용속도를 계산하여 가장 낮은 전단율인 600(1/s)에서는 84%, 보유하고 있는 점도계의 측정한계 범위인 전단율인 960(1/s)에서는 최고 80%까지 증가함을 알 수 있었다. 또한 부피비가 증가할수록 열전도도와 점성 계수가 상승하였으며 특히 유효점성계수가 전단율이 증가하면서 감소하는 현상과 열전도도의 상승폭보다 점성 계수의 상승폭이 전단율인 600~960(1/s) 범위 내에서 더 큼을 확인할 수 있었다. 본 연구결과에서 제시한 기본 물질치를 바탕으로 현 단계의 결과만으로 바로 상용시스템에 적용하는 것은 기술적으로 힘들 것으로 사료된다. 다만 20,000(1/s) 정도의 높은 전단율에서 기본유체 대비 유효점성계수의 감소 가능성과 대류 열전달 계수가 열전도도보다 크다는 실험결과인 두 가지 측면에서 자동차 냉각유체로 본 나노유체의 적용 가능성이 여전히 존재함을 기대 할 수 있었다.

후 기

이 논문은 한국과학재단 (KRF-2006-331-D00051) 특장기초사업에 의하여 지원된 연구 결과이며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) M. S. Lyu, "Vehicle Fuel Economy Improvement by Studies on the Engine Cooling and Ancilliaries System of the Heavy Duty Engine," Transactions of KSAE, Vol.15, No.3, pp.79-84, 2007.
- 2) Y. S. Lyu, J. H. Ryu, S. W. Jung, M. S. Jeon, D. W. Kim, M. D. Eom and J. C. Kim, "A

- Study on the Characteristics of Carbon Dioxide Emissions from Gasoline Passenger Cars,” Transactions of KSAE, Vol.15, No2, pp.58-64, 2007.
- 3) J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu and L. J. Thomson, “Anomalously Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles,” Appl. Phys. Lett., Vol.78, No.6, pp.718-720, 2001.
 - 4) S. H. Kim, S. R. Choi and D. Kim, “Thermal Conductivity of Metaloxide Nanofluids: Particle Size Dependence and Effect of Laser Irradiation,” ASME J. Heat. Transf., Vol.129, pp.298-307, 2007.
 - 5) S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li and J. A. Eastman, “Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles,” J. Heat Transf., Vol.121, pp.280-289, 1999.
 - 6) C. H. Li and G. P. Peterson, “Experimental Investigation of Temperature and Volume Fraction Variations on the Effective Thermal Conductivity of Nanoparticle Suspensions (nanofluids),” J. Appl. Phys., Vol.99, 084314, 2006.
 - 7) C. H. Li and G. P. Peterson, “The Effect of Particle Size on the Effective Thermal Conductivity of Al₂O₃-water Nanofluids,” J. Appl. Phys., Vol.101, 044312, 2007.
 - 8) S. M. S. Murshed, K. C. Leong and C. Yang, “Enhanced Thermal Conductivity of TiO₂-water Based Nanofluids,” Int. J. Therm. Sci., Vol.44, pp.367-373, 2005.
 - 9) S. M. S. Murshed, K. C. Leong and C. Yang, “Investigations of Thermal Conductivity and Viscosity of Nanofluids,” Int. J. Therm. Sci., Vol.47, pp.560-568, 2008.
 - 10) H. E. Patel, S. K. Das, T. Sundararajan, N. A. Sreekumaran, B. George and T. Pradeep, “Thermal Conductivities of Naked and Monolayer Protected Metal Nanoparticle based Nanofluids: Manifestation of Anomalous Enhancement and Chemical Effects,” Appl. Phys. Lett., Vol.83, No.14, pp.2931-2933, 2003.
 - 11) J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li and L. J. Thompson, “Enhanced Thermal Conductivity through the Development of Nanofluids,” Proc. Symp. Nanophase and Nanocomposite Mater. II, Vol.457, pp.2-11, 1997.
 - 12) M. P. Beck, Y. Yuan, P. Warriar, A. S. Teja, “The Thermal Conductivity of Alumina Nanofluids in Water, Ethylene Glycol, and Thylene Glycol + Water Mixtures,” Journal of Nanopart Research Paper, Vol.12, No.4, pp.1469-1477, 2009.
 - 13) H. E. Patel, T. Sundararajan and S. K. Das, “An Experimental Investigation into the Thermal Conductivity Enhancement in Oxide and Metallic Nanofluids,” Journal of Nanopart Research Paper, 2010.
 - 14) F. P. Incropera and D. P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th Edn., Wiley, New Jersey, 2002.
 - 15) J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, pp.360-366, Oxford : Clarendon Press, Oxfordshire, 1873.
 - 16) D. P. H. Hasselman and Lloyd F. Johnson, “Effective Thermal Conductivity of Composites with Interfacial Thermal Barrier Resistance,” Journal of Composite Materials, Vol.21, pp.508-515, 1987.
 - 17) S. K. Das, N. Putra and W. Roetzel, “Pool Boiling Characteristics of Nano-fluids,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.46, pp.851-862, 2003.
 - 18) R. Prasher, D. Song and J. Wang, P. Phelan, “Measurements of Nanofluid Viscosity and Its Implications for Thermal Applications,” Applied Physics Letters 89, 133108, 2006.
 - 19) N. Putra, W. Roetzel and S. K. Das, “Natural Convection of Nano-fluids,” Heat and Mass Transfer, Vol.39, pp.775-784, 2003.
 - 20) H. L. Kwon and S. P. Jang, “Study on Thermal Conductivity and Viscosity of Distilled Water/ Commercial Coolant Based Al₂O₃ Nanofluids,” Trans., 2010 Spring Annual Conference, KSME, pp.42-45, 2010.
 - 21) Y. Ding, H. Alias, D. Wen and R. A. Williams, “Heat Transfer of Aqueous Suspensions of Carbon Nanotubes (CNT Nanofluids),” Interna-

- tional Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.49, pp.240-250, 2006.
- 22) Y. He, Y. Jin, H. Chen, Y. Ding, D. Cang and H. Lu, "Heat Transfer and Flow Behavior of Aqueous Suspensions of TiO_2 Nano Particles (nanofluids) Flowing Upward through a Vertical Pipe," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.50, pp.2272-2281, 2007.
 - 23) K. Y. Kwak and C. Y. Kim, "Viscosity and Thermal Conductivity of Copper Oxide Nanofluid Dispersed in Ethylene Glycol," Korea-Australia Rheology Journal, Vol.17, No.2, pp.35-40, 2005.
 - 24) H. Chen, W. Yang, Y. He, Y. Ding, L. A. A. Lapkin and D. V. Bavykin, "Heat Transfer and Flow Behaviour of Aqueous Suspensions of Titanate Nanotubes (Nanofluids)," Powder Technology, Vol.183, pp.63-72, 2008.
 - 25) W. Yu, H. Xie, L. Chen and Y. Li, "Investigation of Thermal Conductivity and Viscosity of Ethylene Glycol Based ZnO Nanofluid," Thermochemical Acta, Vol.491, No.1-2, pp.92-96, 2009.
 - 26) H. Chen, Y. Ding and C. Tan, "Rheological Behaviour of Nanofluids," New Journal of Physics, Vol.9, p.367, 2007.
 - 27) H. Chen, Y. Ding and A. Lapkin, "Rheological Behaviour of Nanofluids Containing Tube / Rod-like Nanoparticles," Powder Technology, Vol.194, pp.132-141, 2009.
 - 28) A. Einstein, "Eine Neue Bestimmung der Molekul," Annalen der Physik., Vol.19, Vol.2, pp.289-306, 1906.
 - 29) G. K. Batchelor, "Effect of Brownian-motion on Bulk Stress in a Suspension of Spherical-particles," Journal of Fluid Mechanics, Vol.83, No.1, pp.97-117, 1977.
 - 30) B. C. Pak and Y. I. Cho, "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particle," Experimental Heat Transfer, Vol.11, pp.151-170, 1998.
 - 31) C. T. Nguyen, G. Roy, C. Gauthier and N. Galanis, "Heat Transfer Enhancement Using Al_2O_3 -water Nanofluid for an Electronic Cooling System," Applied Thermal Engineering, Vol.27, pp.1501-1506, 2007.
 - 32) D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. Li, S. Cheong, Y. Hwang, J. Lee, D. Hong and S. Moon, "Convective Heat Transfer Characteristics of Nanofluids under Laminar and Turbulent Flow Conditions," Current Applied Physics, Vol.9, pp.119-123, 2004.
 - 33) D. Wen and Y. Ding, "Experimental Investigation into Convective Heat Transfer of Nanofluids at the Entrance Region under Laminar Flow Conditions," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.47, pp.5181-5188, 2004.
 - 34) K. B. Anoop, T. Sundararajan and S. K. Das, "Effect of Particle Size on the Convective Heat Transfer in Nanofluid in the Developing Region," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.52, pp.2189-2195, 2009.
 - 35) K. S. Hwang, S. P. Jang and S. U. S. Choi, "Flow and Convective Heat Transfer Characteristics of Water-based Al_2O_3 Nanofluids in Fully Developed Laminar Flow Regime," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.52, pp.193-199, 2009.